

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

重力式擋土牆地震滑移之分析

Analysis of Seismic Sliding of Gravitational Retaining Walls

計畫編號：NSC 89-2211-E-002-153

執行期限：89年8月1日至90年12月31日

主持人：陳正興 國立臺灣大學土木工程學研究所

一、中文摘要

近年來，港灣擋土結構在地震時受損情形很多，其原因主要是源於動態土壓力之增加與土壤因激發超額孔水壓，導致基礎土壤承載能力不足，或是沿背填土與基礎土壤的邊坡型滑動破壞，甚至液化造成整體性的流動破壞。欲澈底瞭解此問題之機制，應從：傳統室內實驗、大型模型實驗、現地實例分析與理論或數值模式分析等方面進行研究。由於重力式沈箱具施工快速及無噪音之優點，因此常用於深水碼頭；但其在地震時容易產生滑移現象，如921集集地震與1995年的日本阪神地震即有沈箱滑移現象發生。基於上述的原因，本研究中，將以"重力式擋土牆地震滑移分析"為研究方向，以理論或數值模式分析為主要的研究方法，發展完整的單自由度分析模式，以及二維平面應變分析模式，另外，為了檢核所發展的分析模式之合理性，將配合國內現有之破壞案例，與國外文獻資料，進一步以本研究所發展之分析模式進行驗證分析。

關鍵詞：地震、滑移量、液化、重力式擋土牆、港灣碼頭

Abstract

From past experiences, it can be found that the harbor quaywalls are more susceptible to be severely damaged during earthquakes, which can cause heavy loss of economics. Those failures are mainly

attributed to the increase of dynamic earth pressure and the subsequently liquefaction phenomena, which cause the lateral displacement toward the sea. Therefore, the sliding resistance is the key point for seismic design of a caisson-type quaywalls.

In order to improve the performance of gravity caisson-type quaywalls against sliding during earthquakes, this study will focus on "Analysis of Seismic Sliding of Gravitational Retaining Walls." The solution approaches are emphasized upon the theoretical and numerical analysis. In addition, the case histories of damaged quaywalls during earthquakes will be analyzed by using the developed models in this study for verification studies.

Keywords: earthquake, sliding displacement, liquefaction, gravitational retaining walls, quay walls.

二、緣由與目的

擋土結構於地震期間之損壞現象一直是大地工程師所關切的問題，最早引起工程師注意動態土壓力問題的地震，是發生於1923年，規模8.2的日本關東大地震，而目前工程界仍廣為使用的Mononobe-Okabe動態土壓力理論即是源於此地震災害的研究。根據Matsuo & O'Hara (1960)對於23個重力式港灣擋土牆破壞案例之觀察，其中有16個是屬於牆底之滑動破壞，而另外7個則是兼具滑動與傾斜之破壞，因此建議主要的破壞模式

是滑動破壞。[1,2]

從文獻上的記載，上述的破壞特徵中，滑移量有達到 5 公尺之多，而沈陷量也有高達 2 公尺者，而且，通常是沿著港灣全線同時發生（長達數十或是數百公尺），因此造成港灣功能完全癱瘓，而其損失與復原工作所需費用與時間則難以估計。根據相關地震災害文獻資料的收集，從 1923 年至 1995 年期間，至少有 17 個破壞案例有文獻記載，其地震規模皆大於 6；災情比較嚴重者，絕大部份皆有液化現象之報導。以 1995 年的日本阪神地震為例，雖然於以往已經累積了很多的港灣耐震設計實務經驗與謹慎施工，仍然造成重力式沈箱碼頭的滑動位移，平均達 3 公尺之多，而外傾角約 4 度[3]。

另外，值得一提的是，臺灣地區分別於 1986 年與 1999 年遭受花蓮地震與集集地震之災害，造成蘇澳港與臺中港嚴重受損；其中花蓮地震導致蘇澳港之港埠地區的龜裂及下陷之現象，其中 #3、#4、#5 碼頭發生滑動與傾斜的情形，經測量結果，若以角隅為基準，其最大外傾位移分別約為 50、40、50 公分。而集集地震則引致臺中港最大滑移量高達約 170 公分[6]。

由於土壤之組成律以及地震的不確定性，目前對於擋土結構之受震行為研究仍未臻完善；於工程實務上，主要仍是以力平衡為要求的擬靜態分析法設計之，而另外一種比較合理的設計方法，則是以容許滑移量為耐震要求的設計方法。然而，上述常用之設計方法都因為過度簡化，忽略土體之變形性，無法考慮真實動態行為的動態放大效應；尤其對於港灣擋土結構而言，土壤之激發超額孔水壓、液化等現象都無法併入考慮。因此本研究將以理論或數值模式分析為研究方法，發展一完整而具實用性的沉箱滑移分析模式，供工程設計使用。

三、結果與討論

本研究計畫所完成之重要成果包含下列四項，分述如次：

1. 滑動反應譜之理論基礎與曲線特性

自從 1965 年 Newmark 提出滑動塊體分析模式以來，很多學者曾利用該模式進行邊坡或擋土牆受地震作用之滑移分析，企圖建立地震滑動反應譜供耐震設計之用，惟根據以往地震記錄所計算之滑移量上限值，往往在新的大地震發生以後即被超越，致無法確實掌握設計的標準。有鑑於此，本研究乃重新徹底探討該模式之理論基礎、基本假設、以及影響因素等，以幾何學與微積分推證利用 Newmark 滑動塊體分析模式所建立之滑動反應譜的特性，已證明之項目包含下列各項：

- (1) 滑動反應譜曲線具有連續性與單調遞減的特性；
- (2) 滑動反應譜曲線之斜率為負；滑動反應譜曲線之曲率為正。上述各項證明之細節相當繁長，詳細內容可參考研究成果報告。根據這些證明，可確實掌握滑動反應譜曲線之特性，作為以下建立正規化滑動反應譜之基礎與根據。

2. 正規化滑動反應譜

根據前人研究之建議，以尖峰加速度 A 、尖峰速度 V 與卓越週期 $2T$ 等三個重要的參數進行探討，從單週期規則脈衝之特性中得知，豐腴度、卓越週期與滑動次數等是引致滑動的三個重要因素；但是目前常用之正規化因子 V^2/A 與 AT^2 皆只能考慮到個別的因素，而無法比較客觀地評估地震記錄引致滑移量的危險程度，有檢討之必要。

本研究首先從不規則的加速度歷時進行單次滑動之滑移量開始探討，以滑移量的表達式知道正規化因子的形式，最後，考慮到豐腴度、卓越週期與滑動次數等因素，建議新的正規化因子為

$$E_2 = A \cdot T \cdot \left[\int_0^L r^2(t) dt \right] / 2$$

其中 A 為地震尖峰加速， T 為地震加速度記錄之顯著週期，而 $r(t)=a(t)/A$ 則為正規化之加速度記錄。

繼則選用 1976 年至 1985 年期間在臺灣地區之 40 個記錄作分析，依照 Newmark (1965) 之滑動塊體分析法計算地震記錄於不同 N/A 值所引致之總滑移量，然後依照地震記錄之三種正規化因子值 (V^2/A 、 AT^2 ，與 E_2)，分別進行正規化，比較之結果列於下表中。

正規化因子	正規化滑移量 ($N/(A+)=0.05$)	離散寬度 $\log(\text{最大值}/\text{最小值})$
1	(1,120) cm	$\log 120 \approx 2.08$
V^2/A	(10,100)	$\log 10 = 1$
AT^2	(0.5,50)	$\log 100 = 2$
E_2	(0.5,5)	$\log 10 = 1$

根據 40 個地震記錄之分析結果顯示，本研究建議之正規化因子值與總滑移量有度最密切的關係，根據此因子正規化之地震滑動反應譜具有較窄之帶寬，結果如圖 1 所示。又經進一步研究顯示 $2E_2$ 與 D_0 具有良好之線性關係，如圖 2 所示，其中 D_0 為當 $N/A=5\%$ 時所對應之滑移量，表示以 D_0 作為正規化因子亦可獲得不錯之結果。因此，若利用大量之地震記錄作滑移分析，所得之正規化反應譜將可作為訂定耐震設計規範之標準。

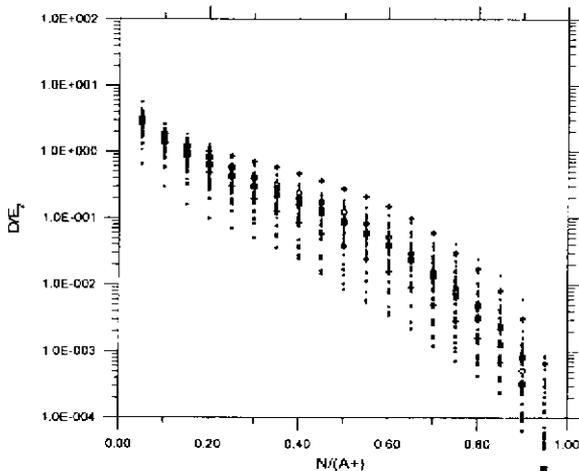


圖 1 以 40 個地震記錄測試無因次化因子 E_2

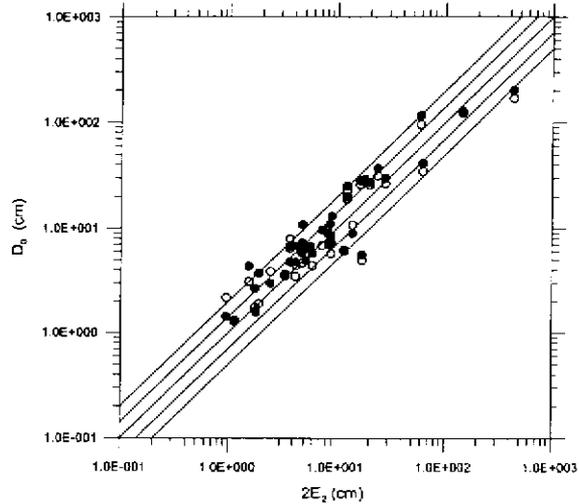


圖 2 測試用 40 個地震記錄之滑移量 D_0 與 $2E_2$ 之關係

3. 沉箱滑移之簡化分析模式

為分析地震作用時沉箱產生大位移之現象，如 1995 年日本神戶之港島與 1999 年台灣集集地震時台中港碼頭之破壞現象，本研究提出一簡化分析模型如圖 3 所示，將沈箱及其背填土分為三個區域，依序為沈箱區、背填卵礫石區與不穩定土楔區，其中沈箱與背填卵礫石均假設為剛體，而不穩定土楔區係表示於地震期間之有效振動土體，其水平作用力將傳經卵礫石區及沈箱區而引致沈箱產生滑動，圖中假設之土楔大小為一底部為 α 角度之土楔，其值與超額孔隙水壓 r_u 具有下列關係

$$\alpha = \tan^{-1}((1 - r_u) \tan \phi)$$

$$r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0}$$

其中 r_u 為超額孔隙水壓係數，定義為超額孔隙水壓 Δu 與土壤有效圍壓 σ'_0 之比值，而 ϕ 為背填土壤之抗剪角。上式表示當超額孔隙水壓於地震期間升高時，不穩定土楔坡角 α 亦隨之降低。

根據圖 3 所建立之分析模型，不穩定土楔區於地震期間所產生之水平作用力包含靜態土壓力 P 與慣性力 $(WT)(N)$ ，其中 WT 為不穩定土楔之質量，為坡角 α 之函數，而

N 為導致滑動之臨界加速度係數，決定於地震記錄之滑動反應譜。藉此分析模型，即可用於分析 1995 年日本神戶港島與 1999 年台灣台中港碼頭受地震作用之破壞現象，根據已知之沉箱滑移量及所受地震加速度之大小，反算不穩定土楔之範圍，以及對應之超額孔隙水壓上升程度，為一簡單又實用之分析方法。

4. 案例分析

為驗證本研究所提分析法的適用性，本研究選取三個案例進行分析，分別為：

- (1) 1995 年日本阪神地震之神戶港島 P-3 斷面之破壞現象；
- (2) 1999 年台灣集集地震之台中港 2 號碼頭破壞現象；
- (3) 震動台液化試驗。

利用圖 3 所示之簡化分析模型進行反算分析，結果顯示均能合理推估三案例之實際破壞現象，顯示本研究所提分析模式具實用性。

又為進一步驗證，本研究亦利用 PLAXIS 程式進行有限元素法分析，三案例之分析結果如圖 4~6 所示，圖中粗實線代表根據元素受較大剪應變所識別得之滑動面，表示沉箱產生滑移時，其背填土區域將發展出一相當大之不穩定土楔，與本研究提出之沉箱滑移簡化分析模型之現象相當符合。

四、結論

- (1) 本研究以幾何學與微積分理論推證利用 Newmark 滑動塊體分析模式所建立之滑動反應譜為一具連續性而單調遞減的曲線，且其斜率為負，而曲率為正。
- (2) 本研究提出以 E_2 或 D_0 作為滑動反應譜之正規化因子，經一系列之參數分析與地震記錄分析之比較，結果顯示所得正規化滑動反應譜具有較窄之帶寬，可作為訂定耐震設計規範之根據。
- (3) 本研究所提出之沉箱滑移分析模型為一簡化之分析模型，將沉箱及其背填土

分為三個區域，依序為沈箱區、背填卵礫石區與不穩定土楔區，對於產生大滑移現象之沉箱擋土結構物，可根據已知之沉箱滑移量及所受地震加速度之大小，反算不穩定土楔之範圍，以及對應之超額孔隙水壓上升程度，為一簡單又實用之分析方法。

- (4) 為驗證本研究所提沉箱滑移簡化分析法的適用性，本研究選 1995 年日本阪神地震之神戶港島 P-3 斷面之破壞現象，1999 年台灣集集地震之台中港 2 號碼頭破壞現象，以及震動台液化試驗等三個案例進行分析，結果顯示均能合理推估三案例之實際破壞現象，另又利用 PLAXIS 程式進行有限元素法分析，亦得類似之破壞現象，顯示本研究所提分析模式具實用性。

五、參考文獻

- [1] Fukuoka, M. and Imamura, Y. (1990), Research on Retaining walls during Earthquakes," Proc. 8th World Conf. on Earthquake Engineering.
- [2] Hayash, S. and Katayama, T. (1970), Damage to Harbour Structures by the Tokachioki Earthquake," Soils and Foundations, 10(2), pp. 83~102.
- [3] Inagaki, H. and Iai, S. (1996), Performance of Caisson Type Quaywalls at Kobe Port," Special Issue of Soils and Found., pp. 119~136.
- [4] International Association for Earthquake Engrg., (1992), "Earthquake Resistant Regulations A World List - 1992."
- [5] Seed, H. B. and Whitman, R. (1970), Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads," ASCE Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures, Ithaca, NY, pp.103-147.
- [6] 交通部運輸研究所港灣技術研究中心 (1999), 「臺中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究」, pp. 11-21。

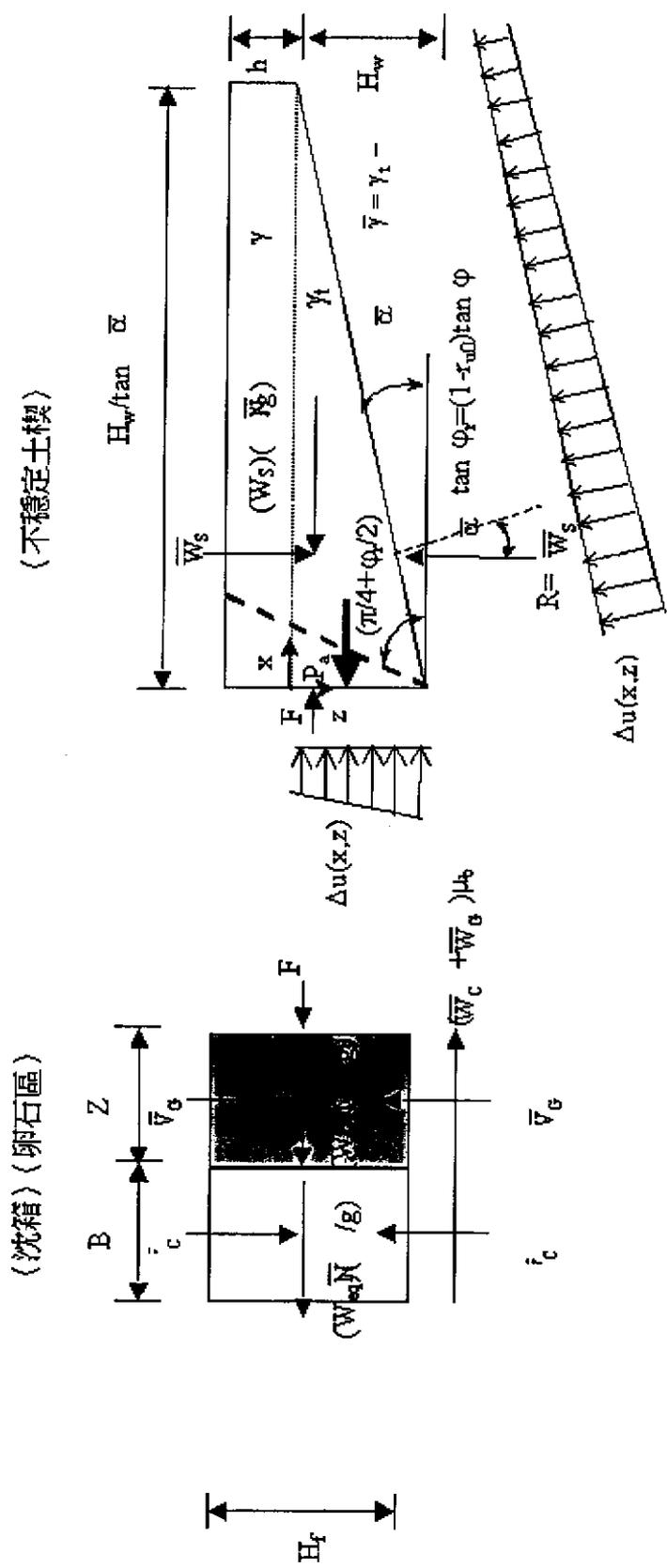


圖 3 港灣滑動塊體簡化模型示意圖

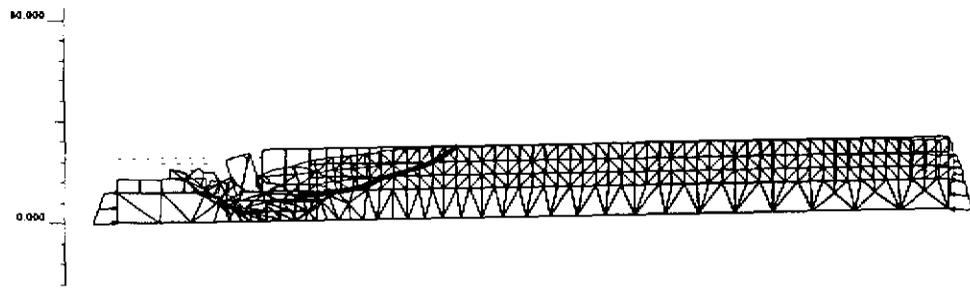


圖 4 P3-H 案例分析獲得之變形剖面與對應之不穩定土楔底邊界線

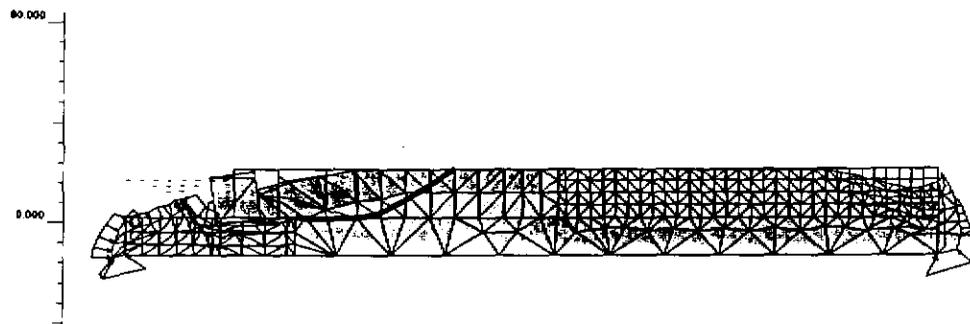


圖 5 TC-H 案例分析獲得之變形剖面與對應之不穩定土楔底邊界線

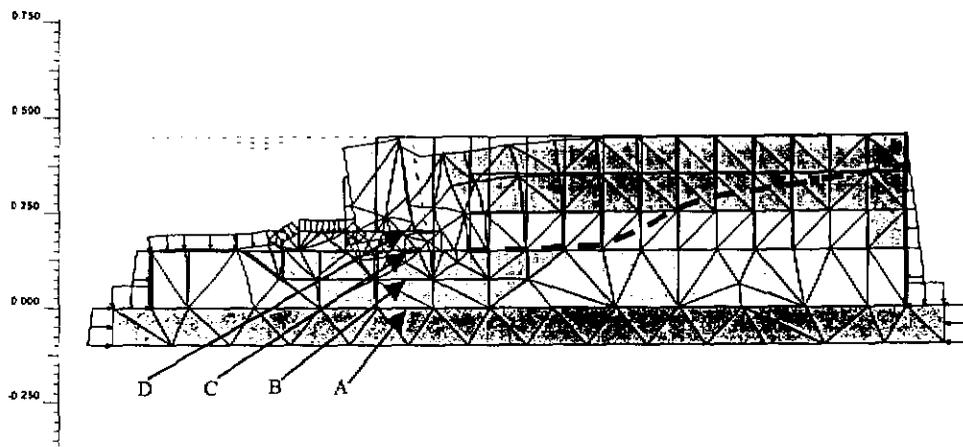


圖 6 TYP-H 案例之變形剖面與對應不穩定土楔底邊界線